N° d'enregistrement
au C.N.R.S.

ARTICLE PRINCIPAL

Recouvrant en partie

LA THÈSE DE DOCTORAT ÈS-SCIENCES NATURELLES

présentée

A LA FACULTÉ DES SCIENCES

DE PARIS

par

M. BUI HUU TRI

pour obtenir

LE GRADE DE DOCTEUR ÈS-SCIENCES

Sujet de la thèse : **DYNAMIQUE DE LA GRANULATION DU SOL SOUS PRAIRIE**

Soutenue le : 22 DEC. 1969 devant la commission d'examen :

MM. P. CHOUARD Président
G. LEMÉE
S. HENIN } Examinateurs
G. MONNIER

Ann. agron., 1968, **19** (4), 415-439.

DYNAMIQUE DE LA GRANULATION DU SOL SOUS PRAIRIE

BUI HUU TRI

Laboratoire des Sols,
Centre national de Recherches agronomiques, 78 - Versailles

Annales agronomiques
INSTITUT NATIONAL DE LA RECHERCHE AGRONOMIQUE
149, rue de Grenelle Paris-7e

UNIV.
LEIDEN
BIBL.

Ann. agron., 1968, **19** (4), 415-439.

DYNAMIQUE DE LA GRANULATION DU SOL SOUS PRAIRIE

BUI HUU TRI

Laboratoire des Sols,
Centre national de Recherches agronomiques, 78 - Versailles
Institut national de la Recherche agronomique

SOMMAIRE

De tous les processus qui entrent en jeu dans la « granulation » de la structure d'un sol sous graminées fourragères l'action mécanique réciproque des racines et du milieu semble la moins étudiée. Ce travail s'est attaché à explorer cet aspect du problème et à mettre en évidence les principaux mécanismes qui s'y rapportent.

INTRODUCTION

La structure granulaire est souvent considérée comme caractéristique d'un sol sous prairie. Mais si la granulation, autrement dit la formation des éléments structuraux sous forme de grains ou d'agglomérats arrondis plus ou moins gros sous l'influence des graminées fourragères, est un fait assez répandu, il est à noter aussi qu'elle ne se manifeste pas dans toutes les situations et de la même manière. Ainsi, on a pu remarquer que pour certains sols, la granulation apparaît assez rapidement après l'établissement de la prairie, que pour certains autres elle n'apparaît qu'après une période relativement longue, tandis que pour d'autres encore elle n'apparaît pas du tout. Cette variété de comportements souligne la nécessité de connaître le mécanisme de la granulation si l'on veut être à même de prévoir les conditions de son apparition. Or, il semble que c'est un aspect qui n'a pas été étudié d'une manière approfondie. En effet, si l'importance du phénomène de granulation a été reconnue depuis longtemps et ses conséquences globales ont été étudiées avec soin, la genèse même de la granulation n'a pas reçu une attention comparable. Ainsi, la plupart des travaux qui ont été rapportés dans la littérature portent principalement sur la stabilisation des éléments structuraux qui représente l'action intégrée ou le résultat à un stade avancé de l'action des graminées fourragères sur les sols. Par contre, leur action initiale, c'est-à-dire la façon avec laquelle les racines des graminées effectuent la

formation de ces éléments structuraux à partir d'un sol présentant un état physique donné, reste mal connue.

Manifestement c'est la conception imprécise des types d'assemblage qui caractérisent la structure d'un sol en général et celle d'un sol sous prairie en particulier qui est à l'origine de l'absence des recherches sur cet aspect précis du problème. Pour certains auteurs une agglomération de particules élémentaires assez stable à l'eau s'appelle « ped » tandis que le mot « motte » est réservé aux masses de particules artificiellement formées qui ne sont pas habituellement stables dans l'eau (DONAHUE, 1958). D'autres ont appelé « agrégat » un groupe de 2 ou plusieurs particules primaires liées entre elles d'une manière plus tenace qu'avec les particules qui les entourent (KEMPER et CHEPIL, 1965). Pour MARTIN et collaborateurs (1955) un agrégat est une agglomération ou groupe de particules de sol à l'état naturel et dans laquelle les forces qui retiennent ces particules sont beaucoup plus intenses que celles entre les agrégats adjacents. D'autres encore considèrent comme agrégats les éléments inférieurs à 0,2 mm qui sont stables dans certaines conditions. Ces agrégats sont alors considérés comme de véritables unités caractérisant la « microstructure » du sol. S'ils se groupent de façon plus ou moins lâche formant ainsi des ensembles de dimensions variables pouvant dépasser 10 cm, ils sont appelés « faux agrégats » ou « mottes » et ils constituent la « macrostructure » du sol (DEMOLON, 1960).

On voit bien que ces définitions considèrent suivant les cas comme un élément structural un ensemble faiblement cohérent ou une unité fortement stabilisée. Et c'est parce qu'il n'y a pas de distinction expresse faite sur le comportement d'un ensemble faiblement cohérent et d'une unité fortement stabilisée que la nécessité de les étudier séparément n'a pas été apparente, et que la notion « d'agrégats », de « ped » et de « motte » reste toujours vague et ambiguë.

Il en est de même de la conception concernant l'arrangement de ces unités structurales dans le sol. MARTIN et ses collaborateurs (1955) ont souligné que pour beaucoup d'auteurs les termes « structure du sol » et « agrégation » sont interchangeables. Ceci n'est pas entièrement vrai, spécialement, dans le cas des sols sous prairie parce que la structure de ces sols peut être le résultat soit du groupement, c'est-à-dire de l'agrégation de particules élémentaires ou secondaires en éléments de plus grande dimension, soit de la fragmentation des grosses mottes en agrégats plus petits (MARTIN et *al.*, 1965 ; HARRIS et *al.*, 1966). Le terme agrégation ne représente donc qu'un aspect de la formation de la structure. Or celle-ci est un processus dynamique, c'est-à-dire que les éléments structuraux formés seront soumis à une évolution qui dépend des conditions physico-chimiques et biologiques du milieu. Dans ces conditions, les forces liant les particules élémentaires peuvent varier en intensité. Les assemblages résisteront alors plus ou moins à un traitement donné. Dès lors nous avons renoncé à l'attitude qualitative qui est à l'origine des conceptions « d'agrégat », de « ped » et de « motte » que nous venons de rappeler et qui postulent une discontinuité de nature entre les différents constituants structuraux. Au contraire, nous nous proposons d'appeler éléments structuraux, les différents ensembles de particules séparés les uns des autres par des lignes ou des faces de moindre résistance et existant à un moment donné dans le sol. A partir de cette définition, la méthode expérimentale que nous avons employée pour étudier la dynamique de la formation d'une structure dans un sol sous graminées fourragères consiste à :

— définir le principe et mettre au point une méthode de séparation reposant sur des actions suffisamment ménagées pour faire ressortir les assemblages fragiles ;

— étudier la forme et les dimensions des éléments structuraux qui ont pu être mis en évidence par la méthode choisie dans le but de rechercher des critères pour caractériser un sol sous prairie ;

— délimiter, dans la mesure du possible, les étapes de formation et de stabilisation des éléments structuraux et concentrer l'attention, les processus de stabilisation ayant été étudiés en détail ailleurs (G. MONNIER, 1965), sur l'étude des mécanismes qui entrent en jeu dans l'étape de formation de la structure par les racines des graminées fourragères sur les sols présentant chacun les états initiaux suivants :

a) monoparticulaire, constitué par la juxtaposition des particules primaires sans cohésion appréciables, ou des particules agrégées fines ;

b) continu, représenté par une structure n'ayant pas de lignes ou de faces de moindre résistance ;

c) fragmentaire grossier, représentant un état intermédiaire entre les 2 cas précédents et qui est constitué au départ par des éléments structuraux plus ou moins gros.

I. — MÉTHODES D'APPRÉCIATION DE L'ÉTAT STRUCTURAL

A. — *Détection des éléments structuraux : le test à l'alcool*

Quand un agglomérat de terre se trouve en contact avec de l'eau, il se désagrège plus ou moins rapidement. HENIN (1938) a montré que ceci est dû à la dispersion des argiles (SCHLOESING, 1885) et à la compression de l'atmosphère interne (YODER, 1936) de l'agglomérat causée par l'entrée de l'eau dans les pores. La baisse de cohésion résultant du gonflement entraîne la destruction des agglomérats par l'intermédiaire des mécanismes d'éclatement ; nous rechercherons donc un traitement qui ait un effet aussi peu marqué que possible sur cette propriété.

RUSSELL (1938) a rapporté que l'emploi du tamisage direct des échantillons tels qu'on les trouve au moment du prélèvement (PUCHNER, 1911 ; KEEN, 1933 ; NEKRASSOV, 1934) ou séchés à l'air (MANGELSDORFF, 1929 et VOLKOV, 1933) pourrait être une solution. Toutefois ces méthodes de tamisage direct donnent trop d'importance à des actions secondaires diverses y compris celles qui interviennent lors du prélèvement lui-même.

Une autre méthode consiste à traiter et à tamiser les échantillons dans des liquides organiques. Selon RUSSELL (1938), TIULIN fut parmi les premiers à proposer l'emploi du benzène ou du xylène en 1928. D'autres ont signalé l'intérêt de l'alcool éthylique comme liquide de tamisage (KOEPF, 1961) sans en préciser les raisons. Or, CONCARET (1965) a rapporté que la cohésion d'une terre humidifiée diminue à cause du gonflement et qu'en traitant les agglomérats par des mélanges alcool/eau on réduit l'abaissement de cohésion lié à l'humectation à un degré tel que les variations de la pression interne ont des effets négligeables, les agglomérats se trouvant ainsi plus stables. Il est donc probable que l'action de l'alcool sera plus sélective que celle de l'eau permettant ainsi de mettre en évidence les premières phases de la formation des éléments structuraux.

TABLEAU I

Effet de divers traitements sur le comportement des agglomérats de l'Horizon B de Versailles

Tailles des éléments structuraux (mm)	Traitements																	
	A			B			C			D			E			F		
	Cases lysimétriques et % d'éléments structuraux récupérés																	
	17	19	18	17	19	18	17	19	18	17	19	18	17	19	18	17	19	18
> 3	0,73	0,34	2,00	7,93	5,34	35,80	16,10	13,90	42,80	40,00	49,30	84,40	60,50	62,00	94,50	58,0	60,0	95,0
3-2	0,33	0,13	0,46	2,46	3,33	3,34	4,14	5,20	3,50	3,80	4,60	1,60	5,06	4,66	3,33	4,8	5,0	3,0
2-0,5	2,80	2,80	7,74	33,60	30,90	22,40	34,60	36,50	23,20	24,30	18,60	6,00	21,00	18,50	1,73	20,0	19,0	1,0
0,5-0,2	12,80	15,10	19,30	19,40	20,60	11,30	14,10	15,60	9,86	7,26	7,00	1,53	5,40	5,40	0,13	6,4	6,0	0,5
< 0,2	83,34	81,63	70,50	36,61	39,83	27,16	31,06	28,80	20,61	24,64	20,50	6,47	8,04	9,44	0,31	9,0	10,0	0,4

Note : Les numéros 17, 19, 18 représentent respectivement les cases lysimétriques en jachère, sous culture et sous fétuque élevée.
A = Humectés et tamisés dans l'eau
B = Humectés sous vide et tamisés dans l'eau
C = Humectés dans 60 p. 100 alcool et tamisés dans l'eau
D = Humectés dans 95 p. 100 alcool et tamisés dans l'eau
E = Humectés et tamisés dans 95 p. 100 d'alcool
F = Prétraités avec le chlorure de cétyl pyridinium, humectés par l'eau sous vide et tamisés dans l'eau.

Nous avons observé dans une expérience préliminaire que lorsque l'argile est rendue hydrophobe par une substance telle que le chlorure de cétyl pyridinium, $C_{21}H_{38}NCl$, H_2O (LAW Jr, 1966) et que les conditions d'évacuation de l'air sont assurées en opérant sous vide, l'eau peut remplacer l'alcool éthylique et donne des résultats comparables voire identiques. C'est une preuve indirecte du fait que l'alcool éthylique élimine pratiquement les effets de gonflement et de compression, effets qui rendent la méthode du tamisage direct dans l'eau inutilisable. L'étude comparée des divers traitements est résumée dans le tableau 1 qui montre que les traitements au chlorure de cétyl pyridinium et à l'alcool éthylique à 95 p. 100 sont les moins destructeurs. Ils traduisent l'état structural réel d'un sol, c'est-à-dire qu'ils permettent de séparer les éléments structuraux directement visibles dans le sol en place lorsque les conditions d'observation sont favorables. Étant donné la facilité et la rapidité avec lesquelles le traitement à l'alcool peut être réalisé, nous l'avons adopté comme méthode de base pour déceler la présence des éléments structuraux et en évaluer le taux.

Le protocole suivi est le suivant : une prise d'essai de 15 g constituée d'agglomérats séchés à l'air, dont la taille est comprise entre 5 et 10 mm et obtenus par fragmentation de l'échantillon initial, est placée dans un bécher de 600 cm³ de forme basse et recouverte avec 30 cm³ d'alcool éthylique à 95° pendant 1 heure. Les agglomérats sont ensuite versés avec précaution sur un tamis à mailles carrées de 3 mm d'ouverture, qui constitue la partie supérieure d'une colonne de 4 tamis dont les 3 autres ont des mailles de 2 mm, 0,5 mm et 0,2 mm. La colonne est fixée par sa partie supérieure à l'appareil à tamiser de FEODOROFF (1960) et plonge dans un bécher de 5 l contenant de l'alcool éthylique à 95° en s'assurant que le niveau de celui-ci dépasse de 0,5 cm la toile du tamis supérieur. Le tamisage, assuré par l'appareil qui déplace la colonne de tamis de haut en bas et vice versa par

TABLEAU 2

Essai de retamisage des éléments structuraux

Nombre de traitements à l'alcool et de tamisages	Horizon B agrégé fin sans herbe	Horizon B agrégé fin, 2 mois sous ray-grass d'Italie	Case lysimétrique n° 17 (Horizon B, 11 ans en jachère)	Case lysimétrique n° 18 (Horizon B, 3 ans sous fétuque élevée)
Poids des éléments structuraux > 3 mm obtenus après chaque tamisage				
Premier (1)	1 g	4,2 g	10,3 g	18,2 g
Deuxième (2)	0,8 g	3,5 g	9,4 g	17,4 g
P. 100 obtenu au 2e par rapport au 1er	80	83,4	91,3	95,5

(1) Prise d'essai = 20 g.
(2) Prise d'essai = poids obtenus à l'issue du 1er tamisage.

un mouvement hélicoïdal dans l'alcool, comporte 30 coups effectués en 30 secondes. La colonne est ensuite détachée de l'appareil et sortie du bécher. Les unités structurales restées sur chacun des tamis sont placées séparément dans des capsules en porcelaine, séchées à l'étuve à 105°C et pesées. Les résultats sont exprimés en pourcentage du poids total de la prise d'essai. Pour être certain que les éléments structuraux mis en évidence par le traitement à l'alcool sont de vrais agglomérats qui ne changent pratiquement plus de forme et de taille une fois séparés les uns des autres suivant les lignes de moindre résistance par le premier tamisage, nous les avons soumis à un second traitement à l'alcool après séchage, et retamisé. Les résultats montrent effectivement (tabl. 2) que la majorité des agglomérats obtenus lors du premier tamisage se retrouvent après le deuxième.

B. — *Détermination de la stabilité des éléments structuraux*

Après avoir mis en évidence les éléments structuraux, nous avons essayé d'évaluer leur stabilité à l'eau en fonction du temps dans le but de déterminer la période au bout de laquelle la stabilisation commence. Pour cela, nous avons utilisé le test de stabilité structurale mis au point et décrit par HÉNIN et MONNIER (1956). Grâce à l'inclusion des prétraitements des échantillons à l'alcool éthylique et au benzène, ce test permet la distinction des effets de stabilisation par augmentation de la cohésion des agglomérats à l'état humide ou par diminution de leur mouillabilité due aux matières organiques. Les résultats sont donnés sous forme d'un indice S, qui varie de 0 pour les structures très stables, à des valeurs au-delà de 100 pour les structures très instables.

C. — *Étude de l'évolution de la densité apparente*

Les variations de la densité apparente sont mesurées pour apprécier une conséquence globale des changements subis par la structure initiale sous l'influence des racines. Les mesures sont effectuées à l'aide d'un voluménomètre à mercure sur des échantillons d'un volume de l'ordre de 4 à 5 cm^3.

II. — RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX

Les premières séries d'essais sont effectuées en vases de végétation sous serre Le matériel végétal et les sols que nous avons utilisés sont les suivants :

— le *Ray-Grass d'Italie* (variété *Rina*) (*Lolium italicum*) et la Fétuque des Prés (variété *Sequana*) (*Festuca pratensis*) ; ces graminées sont semées dans des pots en plastique à raison de 60 à 130 mg/50 cm^2 ;

— le sable fin de Fontenay (50-200 μ) représentant un milieu monoparticulaire proprement dit ;

— l'Horizon B de Versailles finement agrégé ou compacté ;

— le limon de Bernay compacté.

Le tableau suivant donne la composition granulométrique des sols expérimentés :

TABLEAU 3

Analyse granulométrique des sols utilisés

Classe de particules	Horizon B (%)	Limon Bernay (%)
Argile (< 2μ)	32,6	15,7
Limon fin (2-20μ)	24,0	24,5
Limon grossier (20-50μ)	42,2	45,1
Sable fin (50-200μ)	0,8	13,7
Sable grossier (200μ-2 mm)	0,3	0,9
Matières organiques	négligeable	négligeable

Les essais entrepris sont relativement de courte durée (ne dépassant pas 18 mois) pour éviter les complications qu'une accumulation importante de matières organiques pourrait entraîner.

Dans ce qui suit nous discuterons les résultats de l'action du système racinaire des graminées sur des sols présentant soit une structure monoparticulaire ou agrégée fine, soit une structure compacte. L'étude de l'évolution d'une structure fragmentaire grossière qui est le cas intermédiaire entre les deux structures précitées, fera l'objet d'un article ultérieur.

A. — *Action du réseau racinaire sur un milieu monoparticulaire ou agrégé fin*

1. *Milieu monoparticulaire : sable fin.*

En serre, et après 8 mois sous *Ray-Grass d'Italie* (semé à raison de 130 mg/50 cm²), la structure monoparticulaire initiale reste inchangée. A part les gaines de sable assez cohérentes formées autour des racines, il n'y avait pas de formation d'agglomérats : les quelques mottes que nous avons pu isoler se délitant instantanément en contact avec l'alcool. Nous avons remarqué en outre que la croissance du *Ray-Gras d'Italie* sur le sable fin n'a jamais été satisfaisante malgré les mesures que nous avons prises pour la faciliter. Il en résulte que la quantité de racines obtenues est très faible. Dans ces conditions, l'absence d'une structuration peut résulter de deux sortes de considérations liées aux propriétés du milieu étudié : d'une part ce dernier n'est pas, de par sa texture, comme nous le verrons plus loin, susceptible de réagir fortement à l'action des racines, d'autre part il ne semble pas favoriser le développement du système racinaire lui-même.

2. *Milieu agrégé fin : Horizon B tamisé à 0,5 mm.*

Les pots sont remplis d'Horizon B, constitué par des particules de taille inférieure à 0,5 mm, de façon qu'il n'y ait pas de tassement exagéré. La densité apparente de ce milieu est aux environs de 1,50. Au bout de 2, 4 et 6 mois sous *Ray-Grass d'Italie* (semé à 130 mg/50 cm²) l'évolution de cette structure agrégée fine est étudiée au moyen du test à l'alcool, des mesures de densité apparente et de stabilité structurale. Les résultats obtenus sont rapportés dans les tableaux 4 et 5.

On constate en premier lieu, que la structure initiale a subi un changement qui se traduit par la prise en masse des particules $< 0,5$ mm conduisant à la formation d'éléments structuraux de plus grandes dimensions ; toutefois, ce changement n'affecte ni la densité des mottes ni la stabilité qui conservent leur valeur initiale. On voit qu'en plus de l'action agrégeante des racines, l'Horizon B, à l'encontre du sable fin, a tendance à s'agréger spontanément. La distribution des éléments structuraux dans les pots témoins (sans herbe) 1, 3 et 5 (tabl. 4) montre en effet qu'au bout de 6 mois, 25 à 50 p. 100 des particules inférieures à 0,5 mm se sont agrégées en unités supérieures à 0,5 mm. Cet effet marqué pour la dimension des éléments formés reste toutefois très inférieur à celui obtenu sous végétation. En ce qui concerne le comportement sous l'influence du Ray-Grass, la différence la plus importante entre le sable fin et l'Horizon B agrégé fin est la présence d'argile dans le dernier. Ceci suggère que la présence d'argile soit nécessaire pour que l'action des racines se manifeste.

Si l'on représente les taux moyens de chaque catégorie d'éléments structuraux (obtenus en faisant la moyenne des pourcentages correspondants aux 3 profondeurs étudiées, rapportés dans le tableau 4) provenant des pots n° 2, 4 et 6 et de leurs

TABLEAU 4

Évolution de la structure agrégée fine de l'Horizon B sous l'action des racines du Ray-Grass d'Italie

Traitements	Pot n° 1 (2 mois sans herbe)			Pot n° 3 (4 mois sans herbe)			Pot n° 5 (6 mois sans herbe)			Pot n° 2 (2 mois ray-grass)			Pot n° 4 (4 mois ray-grass)			Pot n° 6 (6 mois ray-grass)		
Profondeur (cm)	0-6	6,0-12,5	12,5-20	0-6	6,0-12,5	12,5-20	0-6	6,0-12,5	12,5-20	0-6	6,0-12,5	12,5-20	0-6	6,0-12,5	12,5-20	0-6	6,0-12,5	12,5-20
Taille (mm)	% des éléments structuraux obtenus et leur distribution																	
> 3	10,0	11,3	32,2	1,3	4,0	7,3	10,0	2,6	14,0	48,0	18,7	34,6	36,3	56,0	86,6	40,5	36,6	60,0
3-2	3,0	1,4	4,0	2,0	2,6	6,6	5,0	5,6	4,6	1,6	2,3	2,3	4,7	2,0	0,6	3,0	2,3	1,3
2-0,5	25,5	20,8	17,3	23,4	25,3	34,6	39,3	42,6	37,3	7,0	16,7	14,8	9,3	6,0	1,2	11,7	10,0	5,3
0,5-0,2	20,5	22,7	16,0	23,6	22,3	16,6	16,6	18,0	16,0	12,6	23,5	17,3	14,3	10,0	2,0	14,7	15,6	8,6
< 0,2	41,0	43,8	30,5	49,7	45,8	34,9	29,1	31,2	28,1	30,8	38,8	31,0	35,4	26,0	9,6	30,1	35,5	24,8

TABLEAU 5

Action de racines du Ray-Grass d'Italie *sur la densité apparente et la stabilité de l'Horizon B présentant une structure agrégée fine au départ*

Traitement	Rendement (g/270 cm²)				Densité apparente				Indice S (1)			
	Nombre d'exploitation				Profondeur étudiée (cm)							
	1	2	3	Total	0-6	6-12,5	12,5-20	Moyenne	0-6	6-12,5	12,5-20	Moyenne
2 mois :												
Pot 1 (sans herbe).....	0	—	—	—	1,54	1,47	1,50	1,50	13,3	11,3	15,5	13,4
Pot 2 (ray-grass).....	36,2	—	—	36,2	1,53	1,46	1,47	1,49	11,5	9,8	15,2	12,2
4 mois :												
Pot 3 (sans herbe).....	0	—	—	—	1,55	1,52	1,49	1,52	15,0	23,0	17,4	17,4
Pot 4 (ray-grass).....	36,2	96,9	—	133,1	1,55	1,47	1,49	1,50	11,7	16,3	13,4	13,4
6 mois :												
Pot 5 (sans herbe).....	0	—	—	—	1,59	1,53	1,53	1,55	20,0	15,7	31,0	22,2
Pot 6 (ray-grass).....	28,3	72,7	79,4	180,4	1,57	1,50	1,49	1,52	16,7	18,9	26,2	20,5

(1) Nous exprimerons la stabilité par l'indice S et non, comme il est courant de le faire par $\log_{10} 10\,S$. Cette attitude est justifiée chaque fois que l'on veut comparer de petites variations de stabilité dues à l'application de traitements à un même matériau.

témoins correspondants (pots 1, 3 et 5 respectivement) sur un graphique (fig. 1), on peut voir nettement l'allure que prend l'évolution de la structure agrégée fine. Elle est caractérisée par une baisse considérable du pourcentage des éléments inférieurs à 2 mm et une augmentation correspondante du pourcentage des éléments supérieurs à 3 mm, tandis que le pourcentage de la catégorie 2-3 mm reste pratiquement inchangé. On se demande en quoi consiste cette sélectivité concernant la taille des éléments structuraux nouvellement formés. Pour répondre à cette question, nous avons essayé d'établir une relation entre la taille des éléments structuraux formés et les dimensions de la maille constituée par le réseau radiculaire.

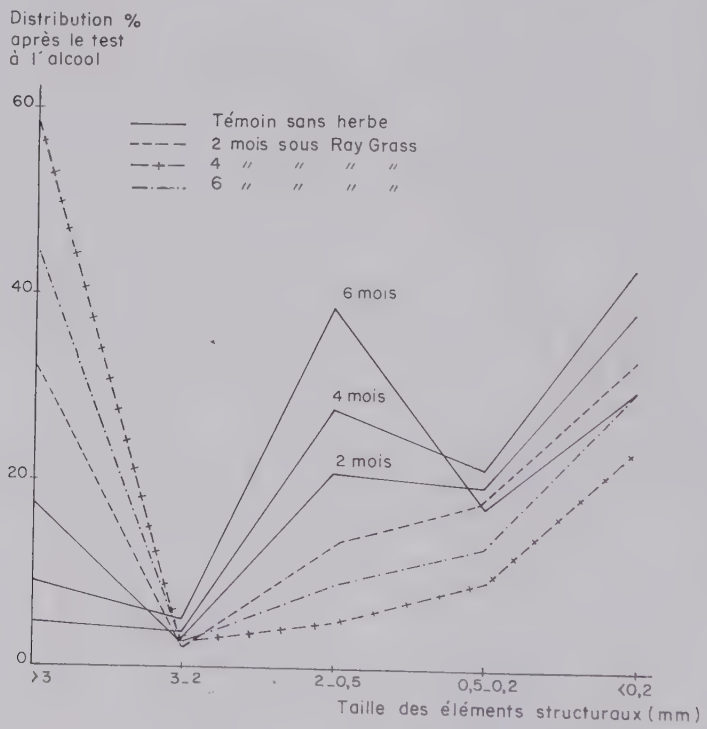

FIG. 1. — *Évolution d'une structure agrégée fine* (Horizon B de Versailles) *sous* Ray-Grass d'Italie

Pour cela nous avons déterminé, à partir des échantillons prélevés au bout de 2, 4 et 6 mois des mêmes pots d'Horizon B sous Ray-Grass, le poids total des racines contenues dans un volume de terre donné et converti ce poids en longueur de racines par la relation 1 g $\approx$ 148 m que nous avons trouvé pour le Ray Grass. Nous appelons longueur spécifique, que nous désignons par L_s, la longueur de racine par unité de volume de sol en place exprimée dans ce cas en m/cm^3. Les calculs nécessaires sont résumés dans le tableau 6. C'est cette valeur L_s que nous avons utilisée pour établir une relation entre les dimensions de la maille radiculaire et la taille prépondérante des éléments structuraux observés. Admettons qu'en général, ces unités soient plus ou moins cubiques et que 1 cm^3 de terre contienne n^3 cubes plus petits; si n est le

TABLEAU 6

Calcul de la longueur spécifique L_s du réseau radiculaire dans un milieu agrégé fin (Horizon B) *au bout de 2, 4 et 6 mois*

Profondeur (cm)	Poids de l'échantillon (g)			*d* Densité apparente			V (cm³) Volume de l'échantillon			W (g) Poids de racines			L_t (m) Longueur totale des racines			L_s (m/cm³) Longueur spécifique		
	Age du Ray-grass (mois)																	
	2	4	6	2	4	6	2	4	6	2	4	6	2	4	6	2	4	6
0-6	293,0	183,3	348,0	1,53	1,55	1,57	191,5	118,2	221,6	0,35	0,26	0,64	51,8	39,1	95,3	0,27	0,33	0,43
6-12,5	259,7	182,4	356,5	1,46	1,47	1,50	178,0	124,1	237,7	0,18	0,12	0,29	26,6	17,6	43,2	0,15	0,14	0,18
12,5-20	362,6	222,9	367,2	1,47	1,49	1,49	247,0	149,6	246,6	0,30	0,58	0,39	44,4	86,3	58,3	0,18	0,57	0,24
Total	915,3	588,6	1 071,7				618,4	392,4	705,0	0,83	0,97	1,33	122,8	143,0	196,8			
Moyenne				1,48	1,50	1,52										0,20	0,36	0,28

Note : $L_t = W \times 148$ (1 g racines = 148 m) ; $L_s = L_t/V$.

nombre de segments qui divisent chaque côté de ce cube, la longueur minimum L_s nécessaire pour couvrir entièrement les arêtes de ces n^3 petits cubes serait :

$$L_s = 3\,n^2 \text{ (1)}$$

Le tableau 7 obtenu à partir de l'équation précédente, donne la relation théorique entre les valeurs L_s et la taille des unités contenues dans 1 cm³ de terre.

La comparaison des valeurs L_s mesurées (tabl. 6) avec les valeurs L_s calculées (tabl. 7) montre que la taille des éléments structuraux formés au sein de l'Horizon B agrégé fin après 2, 4 et 6 mois doit se situer entre 0,30 cm et 1 cm, ce qui est effectivement le cas d'après les résultats obtenus du test à l'alcool (tabl. 4). La maille radiculaire est donc suffisamment dense pour produire des unités supérieures à 3 mm, mais pas assez pour former des unités plus petites. Ce qui explique l'absence quasi totale des unités de 2 à 3 mm et 0,5 à 2 mm si l'on ne compte pas le taux formé par autoagrégation au niveau de cette dernière catégorie.

TABLEAU 7

Calcul théorique de la taille des éléments structuraux en fonction de la longueur spécifique L_s du réseau radiculaire

Taille (cm)	Nombre de segments/cm (n)	Nombre de cubes/cm³ (n^3)	Longueur spécifique L_s (m/cm³)
1,00.....	1	1	0,03
0,50.....	2	8	0,12
0,33.....	3	27	0,27
0,25.....	4	64	0,48
0,20.....	5	125	0,75
0,10.....	10	1 000	1,08
0,05.....	20	8 000	3,63

La conception de la longueur spécifique est d'autre part utile comme indication du degré de transformation d'une structure. Comme nous avons ici une structure agrégée fine constituée par des particules initialement inférieures à 0,5 mm, et comme les unités 0,5 à 2 mm et 2-3 mm ne sont pas directement formées par le réseau radiculaire, nous pouvons considérer le taux des unités supérieures à 3 mm comme un indice du degré d'agrégation au bout d'un temps donné. Le tableau 8 montre qu'il existe une relation directe entre les valeurs L_s et le degré d'agrégation, c'est-à-dire que, dans la période étudiée, l'intensité d'agrégation croît en fonction des valeurs croissantes de L_s. Le poids rapporté sur le tableau 8 représente la moyenne des poids d'éléments > 3 mm obtenus aux 3 profondeurs étudiées et le degré d'agrégation

(1) En effet, pour chaque petit cube d'arête $\frac{1}{n}$ la longueur nécessaire, compte tenu du fait que chaque arête est commune à 4 cubes, est égale à $\frac{12}{n} \times \frac{1}{4} = \frac{3}{n}$. La valeur de L_s correspondante est donc :

$$\frac{3}{n} \times n^3 = 3\,n^2$$

correspondant est calculé en divisant ce poids moyen par le poids total de la prise d'essai (15 g). Le tableau indique aussi une relation entre les valeurs L_s et la taille prépondérante des éléments structuraux conformément à ce qui est signalé plus haut.

TABLEAU 8

Relation entre la longueur spécifique L_s, la taille des éléments structuraux et le degré d'agrégation d'une structure agrégée fine (Horizon B)

Moyenne des 3 profondeurs étudiées

Période sous ray-grass (mois)	Poids (g) des unités > 3 mm	Degré d'agrégation (%)	Taille spécifique des unités (mm)	L_s m/cm³
2	4,8	32,0	3-5	0,20
4	9,1	60,7	2,5-3,3	0,36
6	6,6	44,0	3,3	0,28

Il apparaît que l'intensité d'agrégation dépend en grande partie de la quantité effective des racines présentes dans le sol à un moment donné.

3. *Milieu agrégé fin : sol en place des cases lysimétriques.*

Comme le cas de l'Horizon B en vase de végétation, l'Horizon B dans les cases lysimétriques donne des résultats tout à fait dans le même sens. L'évolution de la structure agrégée fine au départ s'est aussi manifestée par une augmentation des unités supérieures à 3 mm, mais d'une manière plus lente. En plus, le phénomène d'auto-agrégation à ce niveau dans le témoin sans herbe devient appréciable avec le temps. Le tableau 9 montre la distribution des éléments structuraux de l'Horizon B à structure fine au bout de 4 ans sous Fétuque élevée en comparaison avec celle continuellement en jachère nue.

TABLEAU 9

Évolution de la structure agrégée fine de l'Horizon B dans les cases lysimétriques

Taille des unités (mm)	Case 17 (9 ans en jachère)	Case 18 (4 ans sous fétuque élevée)
	P. 100 distribution des éléments structuraux	
> 3	50,6	89,3
3-2	5,3	2,0
2-0,5	27,3	4,6
0,5-0,2	6,6	1,3
< 0,2	10,2	2,8

De tout ce qui précède, il apparaît donc que sur une structure agrégée fine l'action des racines se traduit par une agrégation des particules en unités plus grandes dont la taille spécifique est déterminée par les dimensions effectives de la maille radiculaire. Il apparaît aussi que cette action agrégeante dépend dans ces conditions

de la texture du sol et notamment de sa teneur en argile. On conçoit, dans ces conditions, qu'aucune évolution ne soit perceptible à partir d'une structure monoparticulaire dépourvue d'argile.

B. — *Action du réseau racinaire sur un milieu continu*

1. *Milieu fabriqué: Limon Bernay et Horizon B « compactés ».*

Dans cet essai en serre, nous avons semé la Fétuque des Prés et le *Ray-Grass d'Italie* (semé à 60 mg/50 cm²) sur le Limon Bernay et l'Horizon B préalablement malaxés et compactés en une masse continue. Leur densité apparente après ce traitement est de l'ordre de 1,60 et 1,80 respectivement. Dans un premier temps, les deux graminées s'établissent très lentement, puis la Fétuque meurt, mais le Ray-Grass a survécu. La Fétuque se trouve ainsi éliminée dans les autres essais qui suivent, et le Ray-Grass est le seul à être utilisé.

TABLEAU 10

Évolution de la structure continue initiale du Limon Bernay (A_0, A_2) *et de l'Horizon B* (B_0, B_1) *sous l'action des racines du* Ray-Grass d'Italie

Taille des éléments structuraux (mm)	Traitement, profondeur (cm) et p. 100 d'éléments structuraux											
	B_0 (sans herbe)			B_1 (ray-grass)			A_0 (sans herbe)			A_2 (ray-grass)		
	0-4	4-8	8-12	0-4	4-8	8-12	0-4	4-8	8-12	0-4	4-8	8-12
> 3	86,5	88,0	86,6	54,0	82,6	84,0	98,0	98,0	96,0	95,0	98,0	97,0
3-2	2,1	3,3	3,3	2,8	2,7	5,7	—	—	—	—	—	0,6
2-0,5	2,8	3,3	3,3	12,1	6,7	4,1	—	—	—	0,3	0,1	0,3
0,5-0,2	0,7	0,7	0,7	12,7	2,7	1,0	—	—	—	—	—	—
< 0,2	7,9	4,7	6,1	18,4	5,3	5,2	—	—	—	—	—	—

TABLEAU 11

Évolution de la densité apparente et de la stabilité structurale du Limon Bernay (A_0, A_2) *et de l'Horizon B* (B_0, B_1) *compactés, sous l'action des racines du* Ray-Grass d'Italie

Traitements	Rendement g/pot (50 cm²)	Densité apparente				Indice S			
		Profondeur étudiée (cm)							
		0-4	4-8	8-12	Moyenne	0-4	4-8	8-12	Moyenne
Sans herbe (A_0)	—	1,65	1,62	1,62	1,63	31,0	32,4	25,4	29,6
Ray-grass (A_2)	8,1	1,52	1,63	1,63		10,3	25,8	34,5	23,6
Sans herbe (B_0)	—	1,81	1,79	1,80	1,80	53,5	80,4	93,0	75,6
Ray-grass (B_1)	11,2	1,53	1,49	1,82	—	23,0	53,4	61,8	46,0

Après 6 mois, le test à l'alcool montre qu'une nouvelle structure de l'Horizon B est formée, tandis que la structure continue au départ du Limon Bernay reste sensi-

blement la même (tabl. 10). Le changement de la structure initiale de l'Horizon B est caractérisé par une augmentation du taux des agglomérats plus petits que 2 mm aux dépens de celui des unités plus grandes que 3 mm, par une baisse appréciable de la densité apparente de 1,80 à 1,50 jusqu'à une profondeur de 8 cm et par une diminution sensible de la valeur de l'indice S, c'est-à-dire une augmentation de la stabilité des éléments structuraux (tabl. 11).

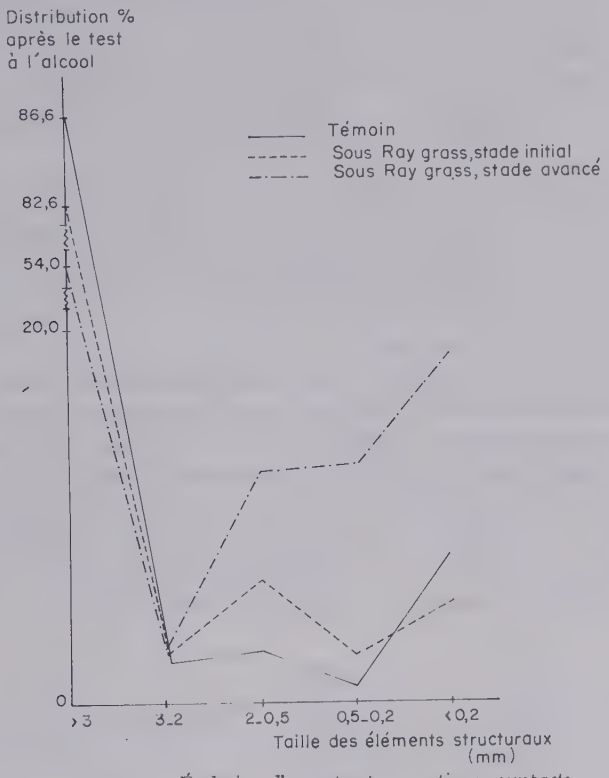

FIG. 2. — *Évolution d'une structure continue, compacte* (Horizon B de Versailles) *sous* Ray-Grass d'Italie

Si l'on représente sur un graphique la distribution des éléments structuraux du témoin B_0 et celle qui correspond à la profondeur 0-4 cm par exemple (tabl. 10), et la distribution de B_1 à des profondeurs de 0-4 cm et 4-8 cm, les courbes qui en résultent ont l'allure indiquée dans la figure 2. On voit que la formation de la nouvelle structure s'effectue par une division de la masse compacte par le réseau radiculaire. Cette division est accompagnée d'un affinement progressif des unités plus grandes que 3 mm vers les fractions 0,5 à 2 mm puis vers les fractions plus fines encore à mesure que le réseau radiculaire devient plus dense. Par ailleurs, la baisse de la densité apparente de 1,80 à 1,50, à la suite de ces changements, entraîne une augmentation correspondante de la porosité de 31,4 p. 100 à 43 p. 100. D'autre part, l'augmentation de la stabilité structurale est montrée par le tamisage des échantillons prétraités au benzène comme due à une baisse de la mouillabilité des unités structurales causée par les matières organiques qui, dans ce cas, sont vraisemblablement des racines mortes en décomposition.

En ce qui concerne le Limon Bernay, il n'y a pas de division poussée de la masse compacte par les racines (tabl. 10) et les changements de densité apparente et de stabilité sont, par conséquent, beaucoup moins prononcés et sont surtout limités à la profondeur 0-4 cm (tabl. 11).

Étant donné les conditions expérimentales identiques sous lesquelles le Limon Bernay et l'Horizon B ont été soumis, la différence de leur comportement sous l'action des racines ne peut être expliquée, comme dans le cas du sable fin et de l'Horizon B agrégé fin, que par la différence de leur composition granulométrique ou plus exactement, de leur teneur en argile. KHEYRABI (1966) a montré que dans un milieu pauvre en argile, la phase argileuse y est discontinue ce qui limite les possibilités de fissuration, parce que le gonflement et le retrait de l'argile qui est à l'origine de la fissuration n'est que localisé et par conséquent, n'affecte pas un volume important de terre. Or, il semble que la capacité du réseau radiculaire à diviser une masse de terre compacte est étroitement liée à l'aptitude de cette terre à se fissurer. C'est ce qui explique pourquoi l'action du Ray-Grass est plus efficace sur l'Horizon B qui est riche en argile, donc fissurable alors que le Limon Bernay ne l'est pas.

2. *Milieu naturel : sols riches en limon.*

Une étude faite sur les échantillons prélevés dans des prairies temporaires établies à la Station d'Amélioration des Plantes fourragères de Lusignan a montré aussi que la présence des graminées ne modifie pas la structure initiale des sols pauvres en argile même au bout d'une période de quelques années (tabl. 12).

Si l'on compare les champs K (3 ans sous maïs, blé et orge) et L (3 ans sous fétuque hybride + trèfle) qui ont pratiquement les mêmes sols, on voit que leur densité apparente reste sensiblement la même et que la persistance de la quasi-totalité des unités 5-10 mm après le test à l'alcool indique qu'il n'y a pas de division par les racines.

TABLEAU 12

Action des graminées sur les sols pauvres en argile dans le milieu naturel

Profondeur étudiée (cm)	K 3 ans Cultures annuelles		L 3 ans Fétuque + Trèfle		E 3 ans Dactyle	
	Densité apparente	Indice S	Densité apparente	Indice S	Densité apparente	Indice S
0-6	1,71	3,10	1,63	1,18	1,70	1,36
6-12	1,72	2,70	1,71	2,07	1,75	1,53
12-24	1,71	2,28	1,66	2,04	1,73	1,44
0-24	1,71	2,69	1,66	1,76	1,72	1,44
Argile (%)	13,4		13,4		16,5	
Limon (%) (2-50μ)	69,6		70,0		66.5	
P. 100 éléments structuraux (5-10 mm)	97,0		97,3		97,0	

C. — *Mécanismes de la formation des éléments structuraux*

Il découle des expériences précédentes que la texture du sol régit plus ou moins directement l'action des racines et que là où la texture est favorable, cette action se traduit par une division ou un affinement de la structure s'il s'agit d'un sol compact ou par une agrégation des particules isolées en unités plus grosses, si le sol au départ est monoparticulaire.

Nous nous proposons maintenant de mettre en évidence les mécanismes qui entrent en jeu dans les processus de division et d'agrégation en opérant à partir des modèles physiques que nous avons fabriqués au laboratoire.

1. *Hypothèse de la pression exercée par les racines.*

Cette hypothèse met l'accent sur l'action physique des racines et, pour la reproduire, nous avons utilisé des fils de fer galvanisés en guise de racines. L'Horizon B agrégé fin (tamisé à 0,5 mm) contenu dans un petit pot rigide et amené à la capacité au champ, la quantité d'eau nécessaire étant apportée par capillarité, est le milieu dans lequel nous avons planté ces fils de fer (diamètre 0,5 mm) à une densité de 100 fils/40 cm². Les modèles sont laissés sécher à l'air puis les fils sont retirés avec précaution. A partir du gâteau troué (A) qui résulte de ce traitement et du gâteau témoin non troué (T), nous avons obtenu par fragmentation mécanique des unités de 5 à 10 mm que nous avons soumis au test à l'alcool. Les résultats du test (tabl. 13) montrent que l'introduction des fils a effectivement causé une agrégation des par-

TABLEAU 13

Effet de l'introduction des fils de fer dans un milieu agrégé fin (Horizon B)

Taille des éléments structuraux (mm)	P. 100 distribution des éléments structuraux	
	Éléments témoins sans canaux (T)	Éléments avec canaux laissés par les fils (A)
> 3	14,0	31,3
3-2	4,6	4,0
2-0,5	37,3	23,3
0,5-0,2	16,0	15,3
< 0,2	38,1	26,1

ticules inférieures à 2 mm en unités supérieures à 3 mm, le taux de ces dernières étant nettement supérieur pour le groupe A que pour le groupe T.

Cette agrégation supplémentaire peut provenir du tassement de la terre humide lors de l'entrée des fils, et (ou) des perturbations liées à la présence des fils lors de la diminution du volume du gâteau causé par le retrait de l'argile quand l'échantillon est mis à sécher. Il y a quelque raison de croire que l'agrégation provient non seulement de la pression locale due à l'introduction des fils mais encore et surtout des

perturbations causées par leur présence puisque le tassement ne diminue que de moins de 1 p. 100 la porosité totale (42,5 p. 100) du volume de terre étudié (200 cm^3), le volume total des fils étant de 0,4 cm^3. Cette diminution de porosité est trop faible, même si elle est localisée au niveau des fils, pour justifier à elle seule l'importante agrégation observée dans le tableau 13. L'existence d'une telle agrégation sous l'influence d'un réseau de fils de fer indique d'autre part le caractère mécanique du processus. Reste à savoir si le déroulement de celui-ci dépend aussi de la texture du sol comme c'est le cas des essais en vases de végétation et dans le milieu naturel. Cet aspect du problème sera discuté dans un article ultérieur.

2. *Hypothèse des alternances d'humectation et de dessiccation.*

a) *Effet de la densité des fils et du nombre de cycles d'humectation et de dessiccation.*

Les essais que nous avons faits avec des fils de nylon (diamètre 0,32 mm) plantés dans des gâteaux (6 cm de diamètre et 2 cm d'épaisseur) d'Horizon B compacté ont montré (tabl. 14) que les fragmentations ne se produisent qu'après deux cycles d'humectation et de dessication et que, dans ce cas, elles augmentent avec la densité d'implantation des fils présents dans les gâteaux.

TABLEAU 14

Résultat du test à l'alcool sur les gâteaux compacts d'Horizon B dans lesquels sont implantés les fils de nylon

Taille des éléments structuraux (mm)	P. 100 distribution des éléments structuraux					
	Nombre de cycles d'humectation et de dessication					
	1 cycle			2 cycles		
	0 fils	200 fils	300 fils	0 fils	200 fils	300 fils
> 3	100	100	100	12,3	8,1	2,2
3-2	—	—	—	8,1	7,7	2,4
2-0,5	—	—	—	33,8	41,7	48,5
0,5-0,2	—	—	—	3,2	2,9	3,2

Les résultats précédents sont obtenus sur des gâteaux fabriqués à partir d'une pâte d'Horizon B drainée sur Büchner. La dessication se fait par séchage à l'air et la réhumectation après chaque cycle, par capillarité en posant les gâteaux sur une couche de sable fin mouillé par en dessous.

b) *Effet des autres facteurs.*

Nous avons aussi remarqué que, pour un nombre de cycles donné d'humectation et de dessication, l'intensité de fragmentation dans les gâteaux varie avec leur humidité de préparation, les conditions de drainage et la température de dessication. On voit dans le tableau 15, que pour deux cyles d'humectation et de dessication et avec

des fils de fer galvanisés de 1 mm de diamètre, la fragmentation est plus intense si les gâteaux sont séchés à l'air plutôt qu'à 105°C, si les gâteaux sont fabriqués à partir d'une pâte contenant un excès d'eau qui est ressuyée par un drainage rapide que s'ils sont fabriqués à 26 p. 100 d'humidité (correspondant à la capacité au champ de l'Horizon B) sans drainage. Remarquons de plus que l'influence considérable de l'humidité de malaxage d'une terre sur sa fragmentation ultérieure a été mise en évidence par HÉNIN (1938). Les résultats obtenus par cet auteur montrent également que le maximum d'agrégation est obtenu par malaxage à une humidité voisine de la capacité au champ.

TABLEAU 15

Facteurs déterminant l'intensité de fragmentation d'un gâteau de terre compacte (Horizon B)

Taille des éléments structuraux (mm)	P. 100 distribution des éléments structuraux						
	40 p. 100 humidité drainage Büchner				26 p. 100 humidité sans drainage		
	Densité de fils/gâteau (20 cm²)						
	0 (air)	0 (105°C)	30	60	0	30	60
> 3	12,3	32,0	25,0	7,7	78,0	62,4	45,4
3-2	8,1	3,2	7,1	4,9	3,8	7,7	11,8
2-0,5	33,8	17,0	20,0	32,0	10,3	20,0	32,3
0,5-0,2	3,2	2,4	1,8	3,7	1,4	2,1	2,3
< 0,2	43,6	45,4	46,1	51,7	6,5	7,8	8,2

Note : Excepté pour la colonne 0 (air) qui désigne la dessication par séchage à l'air, la dessication dans les autres gâteaux se fait à 105°C comme le cas de 0 (105°C).

c) *Rapprochement des résultats obtenus sur modèles et en serre.*

Nous avons constaté que, comme dans le cas du Ray-Grass sur l'Horizon B compacté en serre, la présence des fils de nylon ou de fer galvanisé entraîne la fragmentation de la masse de terre compacte, et que la distribution des éléments structuraux qui en résulte présente les mêmes caractéristiques. C'est dire que sur les modèles, la fragmentation est aussi caractérisée par un affinement des éléments structuraux supérieurs à 3 mm vers les dimensions plus petites (inférieures à 2 mm) et par une bonne relation entre le degré d'affinement des unités formées et la densité des fils. Pour élucider ce dernier point, nous avons récupéré les fractions supérieures à 3 mm après le test à l'alcool dont le taux est rapporté dans le tableau 15 et nous leur avons fait subir un tamisage à sec qui donne une distribution des unités supérieures suivantes : voir tabl. 16.

On voit que, dans le témoin, la fraction > 10 mm est prédominante et qu'elle tend vers la taille 3-5 mm à mesure que le nombre des fils croît vers 60. En effet, la

TABLEAU 16

Distribution des éléments structuraux supérieurs à 3 mm en fonction de la densité des fils de fer implantés dans un gâteau de terre compacte (Horizon B)

Taille des éléments structuraux (mm)	P. 100 distribution					
	40 p. 100 humidité drainage Büchner			26 p. 100 humidité sans drainage		
	Densité de fils/gâteau (20 cm²)					
	0	30	60	0	30	60
> 10	58,0	0	0	68,3	25,6	0
10-5	21,0	45,0	10,4	12,3	40,9	43,3
5-3	11,2	41,5	68,8	9,0	25,6	42,4

prédominance des unités 5-10 mm pour une densité de 30 fils/gâteau et celles de 3-5 mm pour 60 fils/gâteau correspond bien au fait que si l'on divise mécaniquement un gâteau de 20 cm² par 30 et 60 fils, on obtiendrait respectivement, des unité qui sont essentiellement 5-10 mm et 3-5 mm. L'allure que prennent les courbes (fig. 3 représentant la distribution des éléments structuraux est d'ailleurs tout à fait semblable à celle de la figure 2.

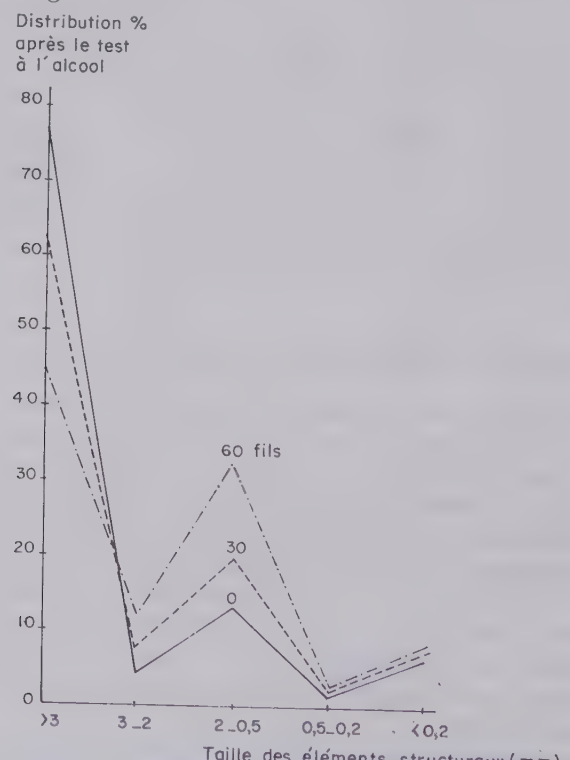

FIG. 3. — *Fragmentation d'une structure continue, compacte* (Horizon B) *en fonction de la densité des fils de fer galvanisés*

3. *Hypothèse des humectations et dessiccations différentielles.*

Dans les deux hypothèses précédentes, nous avons concentré notre effort sur la démonstration de l'effet mécanique causé par la simple présence de fils inertes dans un sol texturalement agrégeable et fissurable. Or, le réseau racinaire est un système dynamique et, par conséquent, il y a raison de croire que par leurs activités biologiques les racines agissent sur le milieu, notamment sur son régime hydrique. Cette action est conçue comme résultant d'une humectation et d'une dessiccation plus poussées dans les régions au voisinage immédiat des racines que dans celles qui se trouvent plus loin, d'où le terme différentiel utilisé. Dans un premier temps, nous avons construit des modèles avec de l'Horizon B compacté sur lesquels nous avons essayé d'effectuer une dessiccation différentielle en chauffant par un bec Bunsen les bouts libres des fils de fer implantés dans le gâteau. En comparant les résultats du test à l'alcool sur les gâteaux ainsi traités avec ceux des gâteaux témoins sans fils, non chauffés, des gâteaux avec le même nombre de fils, mais non chauffés, et des gâteaux avec le même nombre de fils chauffés indirectement par rayonnement de la chaleur provenant du bec Bunsen, nous avons pu isoler l'effet de chaque traitement dans le processus de fragmentation du gâteau.

Nous pouvons voir dans le tableau 17, que la fragmentation la plus intense correspond au traitement des fils chauffés directement, autrement dit, à la dessiccation différentielle subie par le gâteau.

TABLEAU 17

Effet de la dessiccation différentielle sur l'Horizon B compacté

Taille des éléments structuraux (mm)	Traitements et p. 100 distribution des éléments après le test à l'alcool							
	30 fils (dia. 1 mm)/gâteau				60 fils (dia. 0,5 mm)/gâteau			
	Témoin (sans fils)	Fils non chauffés	Fils indirectement chauffés	Fils directement chauffés	Témoin (sans fils)	Fils non chauffés	Fils indirectement chauffés	Fils directement chauffés
> 3	75,5	62,4	57,8	46,5	70,4	67,6	57,8	43,1
3-2	4,0	7,7	7,7	8,6	4,4	7,8	9,4	9,4
2-0,5	12,3	20,1	24,7	32,7	16,1	16,5	23,7	35,4
0,5-0,2	1,6	2,1	2,1	3,6	2,0	1,4	2,0	3,4
< 0,2	6,4	7,7	7,7	8,6	7,1	6,7	7,1	8,7

L'humectation différentielle, qui nécessite un dispositif plus compliqué, sera incessamment étudiée et fera l'objet d'une publication prochaine ainsi que l'étude de l'humectation et de la dessiccation différentielles sur un sol riche en limon difficilement fissurable ou agrégeable.

Remarquons dès maintenant que les modèles ne peuvent pas représenter exactement le milieu sol-racines et que par conséquent, les résultats obtenus ne peuvent être qu'une grossière approximation de ce qui se passe réellement. Dans notre cas, c'est la convergence des résultats avec les faits observés en serre qui justifie leur emploi.

Ils nous sont d'autant plus indispensables qu'ils nous permettent d'isoler les mécanismes qui sont opérationnels dans le processus global de la formation de la structure sous prairie.

CONCLUSIONS

Étant donné la complexité que présentent *a priori* les mécanismes de la granulation du sol sous prairie et le peu d'informations disponibles à cet égard, il nous a paru préférable dans un premier temps, de recenser les différents types d'action susceptibles de se manifester.

Un tel parti a évidemment pour conséquence que les faits sont établis davantage par la convergence de résultats expérimentaux obtenus dans des conditions différentes que par l'étude statistique des données ; une telle étude aurait nécessité des conditions expérimentales hors de notre portée, compte tenu du souci que nous avions d'envisager des aspects très divers du phénomène.

Ceci étant, il est cependant possible de tirer de cette étude un certain nombre d'indications importantes. Tout d'abord, contrairement à l'opinion très répandue qu'il suffit de mettre un sol à structure défavorable sous prairie pour que son état soit sensiblement amélioré, il ressort que *pendant la période relativement courte qui suit l'établissement d'une prairie de graminées* (1), l'efficacité des racines à cet égard dépend non seulement de l'espèce des graminées, mais aussi et surtout de la composition granulométrique des sols et de leur état physique initial. Nous avons vu en effet que la Fétuque des Prés se montre nettement moins efficace que le *Ray-Grass d'Italie*. De même l'effet observé est beaucoup plus marqué dans les sols qui manifestent un certain caractère argileux que dans les terres riches en limons ou en sables fins. Enfin, lorsqu'elle existe, cette action est conditionnée par l'état structural initial. La granulation s'effectue en effet soit par agrégation de particules isolées ou d'éléments structuraux de petites tailles en unités de plus grande dimension, soit par fragmentation des mottes ou de la masse du sol en unités plus petites selon que la structure initiale est pulvérulente ou bien grossière ou continue. Dans les deux cas, le phénomène se traduit par un resserrement de la distribution dimensionnelle des éléments structuraux autour d'une taille moyenne dont les dimensions semblent déterminées par celle de la maille racinaire dans la couche de sol considérée.

Il est à noter, d'un point de vue plus général, que l'action des racines semble se borner à révéler, à accélérer, ou à fortement accentuer une évolution structurale essentiellement conditionnée par la texture du sol. Nous avons vu en effet que si un sol n'est, par ses propriétés, pas fissurable, c'est-à-dire s'il ne se prête pas au gonflement et au retrait suivant son état hydrique, l'action des racines s'avère insignifiante.

L'examen des mécanismes responsables de la formation des éléments structuraux par agrégation ou fragmentation éclaire cette proposition. Nous avons vu en effet que les racines pouvaient agir de deux façons différentes :

— en premier lieu, leur seule présence crée dans le système une hétérogénéité qui suffit à entraîner, selon les cas, une agrégation ou une fissuration, mais toujours par

(1) Notons que la période en question est de l'ordre de grandeur de la durée de végétation d'un engrais vert d'hiver en sol de verger par exemple.

l'intermédiaire d'une perturbation dans le développement des phénomènes de gonflement ou de retrait ; — d'autre part, à cette action mécanique s'ajoute l'effet résultant de la dessiccation préférentielle, qui nécessite lui aussi une possibilité de réaction du sol aux alternances d'humectation et de dessiccation.

D'ores et déjà, ces données contribuent à expliquer de nombreuses observations faites dans le milieu naturel. Elles suggèrent de plus que le choix judicieux de la ou des graminées utilisées, la présence de certaines qualités texturales ou d'un certain état physique initial sont des conditions indispensables à l'amélioration rapide de la structure d'un sol sous prairie.

De plus, comme cette amélioration dépend largement de la quantité de racines présentes, les mesures tendant à faciliter leur développement et prolifération telles qu'une fertilisation équilibrée, une exploitation judicieuse de la partie aérienne, et un drainage adéquat sont évidemment nécessaires.

Reçu pour publication en juin 1968.

SUMMARY

DYNAMICS OF SOIL GRANULATION IN GRASSLAND

The object of this study is to assess the part played by the roots of forage grasses in the formation of soil structure within a relatively short period of meadow establishment not exceeding 18 months.

The experiments were performed with potted plants in the greenhouse and with physical models simulating the root/soil system. The plant material tested included two grasses, *Lolium italicum* and *Festuca pratensis*, sown in different soil media (fine sand, soils rich in silt or in clay) at various physical states (single-grained, finely-aggregated or compacted). The physical models were made up from a clay-rich soil (Horizon B of Versailles), either compacted or not, in which either nylon or zinc wires were embedded. These models were so processed as to reproduce the effects observed from experiments with potted plants in the greenhouse.

The results show that soil texture is apparently the major factor in soil structure formation, the clay-rich soils being found more suitable for structuration than those high in silt or in sand content. The action of the roots *per se* seems to limit itself in revealing a latent structural condition controlled beforehand by the soil texture. The results show in addition that short-term soil structuration depends also on the grass *species* involved. In this study, *Lolium italicum* was more efficient than *Festuca pratensis*.

With regards to the soil structure formation mechanisms, two distinct processes were observed depending on the *initial physical condition* of the soils. Thus granulation occurs either through fragmentation of the soil mass into smaller units, or through aggregation of smaller units into larger elements, depending on whether the soil was originally compact or loose. In both processes, the roots apparently act in two different ways : to begin with, the heterogeneity they bring into the environment could already initiate granulation but this action was on the other hand accentuated by the disturbances brought about by the preferential wetting and drying of the soil in the vicinity of the root system.

Lastly, the average size of the structural elements, obtained either through fragmentation or aggregation, is in good relation with the root density in the soil layer studied.

ZUSAMMENFASSUNG

DYNAMIK DER GRANULIERUNG DES BODENS UNTER KUNSTWIESE

Das Ziel dieser Arbeit besteht darin, die Rolle der Futtergräserwurzeln bei der Bildung der Bodenstruktur während einer verhältnismässig kurzen Periode von Wiesenaufbau, die 18 Monate nicht übersteigt, zu untersuchen.

Die Versuche wurden in angetöpften Pflanzen im Gewächshaus und auf Mustern, die das Wurzel-Boden-System nachahmen, durchgeführt. Die Versuche mit dem Pflanzenmaterial beziehen sich

auf zwei in verschiedenem Milieu (Feinsand, lehmhaltiger Boden, tonhaltiger Boden) gesäte Gräser : *Lolium italicum* und *Festuca pratensis*, die am Anfang ebenfalls verschiedene physikalische Zustände (Einteilchenzustand, feine oder kompakte Zusammensetzung) aufwiesen. Die physikalischen Muster werden mittels eines kompakten oder nicht kompakten tonhaltigen Bodens (Horizont B aus Versailles) hergestellt, in welchem entweder Nylondrähte oder Eisendrähte eingebaut sind. Diese Muster werden Behandlungen ausgesetzt, um die bei den getöpften Pflanzen beobachteten Wirkungen zu reproduzieren.

An Hand der erhaltenen Ergebnisse scheint es, dass die *Bodenstruktur* das Hauptelement bei der Strukturbildung ist, wobei sich die tonreichen Böden als wesentlich günstiger für die Bildung der Struktur erweisen als die lehm-oder sandreichen Böden. Es scheint, dass die eigentliche Wirkung der Wurzeln sich darauf beschränkt, einen latenten strukturellen Zustand zu offenbaren, der im voraus durch die Bodentextur gegeben ist. Ausserdem zeigen die Ergebnisse, dass die kurzfristige Strukturbildung auch von der *Gräsersorte* abhängig ist. In dieser Untersuchung zeigt sich *Lolium italicum* wirksamer als *Festuca pratensis*.

Was die Vorgänge der Strukturbildung, da wo sie sich schätzen lässt, anbetrifft, so werden zwei verschiedene Verfahren im Verhältnis zum *anfänglichen physikalischen Zustand* des Bodens untersucht. In der Tat vollzieht sich die Granulierung entweder durch Zersplitterung der Bodenmasse in kleinere Teichen oder durch Zusammensetzung mehr oder weniger zahlreicher kleiner Teilchen zu grösseren Elementen je nach dem anfänglichen Zustand des Bodens : kompakt oder pulverförmig. In diesen zwei Verfahren scheinen die Wurzeln auf zwei verschiedenen Arten zu wirken : zunächst ruft die durch die Wurzeln in dem Milieu geschaffene Heterogeneität für sich allein die Veränderungen, welche vorzugsweise durch Befeuchtung und Trocknung in dem angrenzenden Boden hervorrufen, verstärkt wurden.

Schliesslich steht die mittlere Grösse der durch Zerplitterung sowie durch Zusammensetzung gebildeten Strukturelemente in guter Uebereinstimmung mit der Dichte der Wurzeln in der betrachteten Bodenschicht.

РЕЗЮМЕ

Динамика гранулирования почв под временными лугами.

БЮИ-ХЬЮ-ТРИ.

Данная работа ставит целью изучение роли корневой системы кормовых злаков в образовании структуры почв в течении относительно короткого периода существования искуственного луга, не превышающего 18 месяцев.

Автор провел серию опытов в вегетационных вазах и с физическими моделями, представляющими систему корни — почва. В опытах с растительным материалом были испытаны следующие злаки : райграс итальянский (*Lolium italicum*) и овсяница луговая (*Festuca pratensis*), посеянные на разной среде (мелкий песок, илистая почва, глинистая почва), находившейся в начале опыта в различном физическом состоянии (монопартикулы, мелкие, или компактные агрегаты). Физические модели были приготовлены на базе уплотненной или неуплотненной глинистой почвы (горизонт В Версаля), в которую были введены пилоновые или проволочные нити. Модели эти подвергались обработкам, чтобы получить эффекты наблюдавшиеся в опытах с вегетационными сосудами.

Полученные результаты указывают, что так-как механический состав почвы должен, по всей вероятности, являться главным элементом образования структуры, то глинистые почвы представляют гораздо более благоприятные условия для ее образования, чем почвы илистые, или песчаные. Что-же касается непосредственного действия корневой системы, ее роль как-будто органичивается проявлением скрытого состояния структуры, управляемой ранее механическим составом почвы. Результаты эти показы-

вают также, что быстрое образование структуры зависит и от вида злака. В данной работе итальянский райграс дал результаты более эффективные, чем овсяница луговая.

В местах где оценка механизма образования структуры была возможна, наблюдалось два различных процесса, в зависимости от начального состояния изучаемой почвы. И действительно, гранулирование происходит при помощи или раздробления почвенной массы на более мелкие единицы, или сплочения более или менее мелких единиц в элементы более крупных размеров, в зависимости от того было-ли начальное состояние почвы плотным или рассыпчатым. В течении обоих процессов корневая система должна действовать двумя способами : сперва, гетерогенность вызванная корнями в среде вызывает сама по себе начало гранулирования; затем действие это дополняется пертурбациями вызванными предпочтительными увлажнением или высыханием почвы по соседству с корнями.

И наконец, средние размеры элементов структуры образовавшихся с помощью раздробления или сплочения зависят от густоты корневой системы в рассматриваемом слое почвы.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

CONCARET J., 1965. *Étude des mécanismes de la destruction des agrégats de terre au contact de solutions aqueuses.* Thèse Fac. des Sci. Univ. de Strasbourg.

DEMOLON 1952. *Dynamique du sol. Principes d'agronomie.* Tome I, 5e éd., Dunod, Paris.

DONAHUE R. L., 1958. *Nature des sols et croissance végétale.* Intercontinental Editions, Inc. N. Y.

FEODOROFF A., 1960. Évaluation de la stabilité structurale d'un sol. (Indice S). Nouvelles normes d'emploi pour l'appareil à tamiser. *Ann. agron.*, **6**, 651-59.

HARRIS R. F., et *al.*, 1966. Dynamics of soil aggregation. *Adv. Agron.* **18**, 471-478.

HENIN S., 1938. *Étude physico-chimique de la stabilité structurale des terres.* Thèse. Univ. de Paris.

HENIN S., MONNIER G., 1956. Évaluation de la stabilité de la structure du sol. *Proc. 6th internation. Sci. Congr.* Vol. B, 49-52.

KHEYRABI D., 1966. *Influence de la composition granulométrique des sols sur leur stabilité structurale.* Thèse Univ. de Paris.

KOEPF H., 1961. Contribution à la formation de la structure chez divers types de sols. *Landw. Forsch.* **14** (1), 1-9.

LAW J. P. Jr, KUNZE G. W., 1966. Reactions of surfactants with montmorillonite. Adsorption mechanisms. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **30** (3), 321-327.

MARTIN J. P., et *al.*, 1955. Soil aggregation. *Adv. Agron.*, **7**, 1-37.

MONNIER G., 1965. *Action des matières organiques sur la stabilité structurale des sols.* Thèse Univ. de Paris

RUSSELL E. W., 1938. Soil structure. *Tech. Comm. nº 37, Imp. Bureau Soil Sci., Harpenden.*